研究論文

PM 充電器と静電水スクラバによる NO_x, PM の低減

—スクラバ水滴挙動による PM 捕集効率の変化—

高山 敦好*・影山 朋久**・藤田 浩嗣**・原野 亘**

要 旨

近年、環境問題が大きく取りあげられ、排出ガス規制は、年々厳しくなっている。排出ガス濃度の低減は急務であり、高い低減効率を持ち備えた研究が必須である。本研究は、排出ガス中の NO_x, PM を取り除くため、乾燥静電集塵機とスクラバの長所を組み合わせた静電水スクラバを開発した。PM と水滴を逆の極性に帯電させ、荷電された水滴がクーロン引力によって PM を捕集する仕組みである。NO_x は溶媒に溶解させた。スプレは、霧化用空気です霧状にした。空気圧は 0.10MPa で水平方向の粒子径が安定し、流量による影響はほぼ皆無であった。また、垂直方向の粒子径は噴霧口から離れるほど粒子径が大きくなった。これらの粒子径の増加によって、粒径が異なる PM が均等に捕集できると考える。スクラバ単体実験では 200mL/min で PM 捕集率が最大となり、PM 充電器と組み合わせることで NO_x は約 14%, PM は約 100%低減できた。

キーワード: 静電スクラバ, コロナ放電, NO_x, PM, 水滴挙動

1. はじめに

1.1 研究概要

NO_x は酸性雨の原因であり、各国で規制の対象となっている。今後は、PM においても厳格な規制が敷かれる予定である。日本は、トラックや船舶など輸送分野で重油の消費が多く、その削減義務は大きい。

排出ガス中の汚染物質の低減を目的とした研究は従来から行われており、内燃機関に関しては燃焼室から排出されるガスの一部を再び燃焼室に循環させる排気再循環 (EGR: Exhaust Gas Recirculation) や、尿素を用いて排出ガス中の有害成分を化学反応により無害化する尿素 SCR システムの研究が行われている。

燃料に関しては、水を混合させた燃料を燃焼させ、不完全燃焼や燃焼温度の低下による排出ガス浄化を目的としたエマルジョン燃料の研究が行われている。

その中で、排出ガス後処理技術は、既存の設備に後付でき、内燃機関の損傷は皆無である。よって、今後

の規制をクリアする上でも優位にあると言える。

本研究は、後処理技術を用いて NO_x, PM (船舶排ガス) の低減を目的とした実験室実験を行った。実験装置は、乾燥静電集塵機 (本装置においては PM 充電器)^{1, 2)} と噴霧水滴 (スクラバ) による PM 捕集³⁻⁵⁾ の長所を組み合わせた静電水スクラバを用いた。

2. 原 理

2.1 位相ドップラ法を用いた計測原理

位相ドップラ法は、粒子により散乱されたレーザ光のドップラ効果を利用し、図 1 に示す。2 本のレーザ光の交差点の干渉縞の間隔 D は式 (1) で決定される。

$$D = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

散乱光強度の変化周波数はドップラ周波数と等価で、

* 神戸大学大学院海事科学研究科 (現 広島商船高等専門学校) Atsuyoshi TAKAYAMA

2011 年 5 月 11 日受付

** 神戸大学大学院海事科学研究科 Tomohisa KAGEYAMA, Hirotsugu FUJITA, Wataru HARANO

2011 年 7 月 11 日受理

図1 光学機器の配置図

流速 V とドップラ周波数 F_d は式 (2) で表される。

$$V = S \cdot F_d \quad (2)$$

粒子がビームの交差領域を通り抜けるとき縞パターンはドップラ周波数でレシーバを通過するように表れる。ドップラバースト信号が各々レシーバによって生じ、かつそれぞれの間で位相差が生じる。この位相差は粒子の曲率により決定できるのでこの位相差を測定することにより粒子径を求めることが可能となる。

液滴粒子径 d が小さい場合は液滴レンズの焦点距離が小さくなり撮影された干渉縞間隔が大きく、位相差が小さくなる。ここで生じる位相差は、液滴直径 d 、媒質の屈折率 n 、及び波長 λ 、入射ビームの交差角度 θ 、レシーバの配置角度 ϕ , ψ の関数で式 (3) となる。

$$\Phi = \frac{\pi \cdot n \cdot d}{\lambda} \cdot 2\Delta \quad (3)$$

ここで Δ は式 (4), (5) に示すように、入射ビームの交差角度 θ 、レシーバの配置角度 ϕ , ψ 粒子の屈折率 m より求まる。屈折が支配的となる空気中の水滴の場合 (5) 式で与えられる。

$$\Delta_{\text{reflect}} = \sqrt{2} \left[\begin{array}{l} (1 + \sin\theta \sin\phi - \cos\theta \cos\phi \cos\psi)^{\frac{1}{2}} \\ -(1 - \sin\theta \sin\phi - \cos\theta \cos\phi \cos\psi)^{\frac{1}{2}} \end{array} \right] \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{refract}} = 2 \left[\begin{array}{l} \left[1 + m^2 - \sqrt{2}m(1 + \sin\theta \sin\phi - \cos\theta \cos\phi \cos\psi)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ - \left[1 + m^2 - \sqrt{2}m(1 - \sin\theta \sin\phi - \cos\theta \cos\phi \cos\psi)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{array} \right] \quad (5)$$

以上により噴霧水滴を計測することが可能である。粒子径は位相のずれを、流速はドップラ周波数差を測定することにより求まる。

2.2 噴霧水滴粒子直径と粒子速度

噴霧水滴の粒子径は、一定時間にレーザ光測定点を通過した粒子の粒子断面積と粒子体積の関係からザウタ粒子径として、式 (6) で求められる。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (6)$$

粒子の平均流速は、個々の粒子速度を平均することにより、式 (7) で求める。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_{li}}{n} \quad (7)$$

2.3 コロナ放電による PM 充電器^{1, 2, 6)}

コロナ放電は、極板間に電圧を印加することにより形成される。電界により電極からの電子放出やイオン生成が行われない場合であっても、大気中に電流が流れる状態である。

PM 充電器は、電極棒と平板を交互に組み合わせたステンレス製のこぎり状のもので、電圧器に接続され、不平等電界を作り出す。これにより、コロナ放電が作り出される。排出ガスを PM 充電器に通過させれば、PM を負に帯電させることができる。

サージタンク内に整流化された排出ガスは、PM 充電器の 5 枚の平板間を通過することにより、 -5kV 、 -6.5kV 、 -7kV の 3 段階の電圧で、負に帯電させる。

3. 実験装置および方法

3.1 原 動 機

本実験で使用した原動機の諸元を表 1 に示す。原動機にはヤンマー製 4 サイクルディーゼルエンジンを使用した。最大出力は $14\text{kW}/2400\text{rpm}$ である。

3.2 レーザドップラ装置

静電水スプレの噴霧水滴の状態を計測するためにレーザドップラ装置 (Aerometrics 製位相ドップラ粒子分析計 (PDPA)) を用いた。この装置は、粒子直径と流速が同時に測定でき、非接触で流体の流れを妨げ

表 1 原動機の諸元表

機関名称	YANMAR NF 19-SK
機関様式	横式水冷 4 サイクルディーゼルエンジン
シリンダ数	1
内径×行程	110×106mm
総排気量	1007cc
最大出力	14kW/2400rpm
連続定格出力	12.6kW/2200rpm

ることがなく応答性が速い。逆流も含めて多次元の流速成分の測定ができる。噴霧水滴中の粒子直径 (μm) 粒子速度 (m/s), 粒子数 (個) を測定した。

3.3 静電水スプレ

噴霧水滴装置として、アネスト岩田製 (E-MW50) の外部帯電方式水性静電水スプレ (静電水スプレ) を用いて、水道水を噴霧させた。静電水スプレは、電圧を変化させ、最大 -50kV 印加することができる。

3.4 実験方法

表 2 に実験条件を示す。原動機は、回転数 2000rpm, 負荷 3.5kW で実験を行った。静電水スプレは、空気圧を決定し、静電スプレの水道水流量 3 パターンと印加電圧 4 パターン及び PM 充電器の印加電圧 3 パターンを変化させ、 NO_x , PM の捕集を行った。使用燃料は A 重油で、その性状を表 3 に示す。

表 2 実験条件

エンジン回転数 (rpm)	2000
エンジン負荷 (kW)	3.5
PM 充電器印加電圧 (kV)	0, -5, -6.5, -7
静電水スプレ流量 (mL/min)	100, 200, 300
静電水スプレ空気圧 (MPa)	0.05, 0.10
静電水スプレ印加電圧 (kV)	0, -10, -20

表 3 A 重油性状

密度 (g/cm^3)	0.841
動粘度 ($\text{mm}^2/\text{s}[\text{cSt}]$)	2.471
引火点 ($^{\circ}\text{C}$)	76.0
残留炭素分 (wt%)	0.64
窒素分 (wt%)	0.01
硫黄分 (wt%)	0.09
総発熱量 (MJ/kg)	45.7
真発熱量 (MJ/kg)	42.8

図 2 に、実験装置の概要を示す。コロナ放電により PM 充電器において PM に帯電を行い、PM 充電器を通過した排出ガスはスクラバ内に流入し、静電水スプレの噴霧水滴によって捕集または溶解される。

測定対象は、 NO_x 及び PM である。 NO_x は、HODAKA 製排出ガス分析装置 (HT - 3000) にて測定した。PM 重量は、ガス流量計によって、排出ガス 25L がフィルタを通過した PM を測定した。フィルタは実験前後に、乾燥機により 50°C にて 2 時間乾燥を行った。吸着前のフィルタとの重量差により、単位体積あたりの PM の残留量を求め、捕集効率を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 噴霧水滴装置による空気圧の決定

静電水スプレの空気圧と水道水流量は、決定する必要がある。スクラバ装置の大きさは、高さ 700mm, 直径 200mm であり、全体に噴霧できる水滴拡散が要求される。図 3 に実験結果を示す。噴霧口から水平方向に 0—20mm, 垂直方向に 0—200mm を測定した。

空気圧 0.05MPa (図 3 (a), (b), (c)) の場合、水平方向の平均粒子径は、各高さにおいて噴霧口直下が最も大きく、噴霧口直下から水平方向に移動するほど粒子径は減少し、流量に関係なく確認された。

空気圧 0.10MPa (図 3 (d), (e), (f)) の場合、ノズルから離れた位置において、水平方向の粒子径は減少がほぼ見られなかった。空気圧 0.05MPa の水滴粒子と比較すると 0.10MPa の水滴粒子はノズルから離れれば一様に拡散した。

垂直方向の測定は、すべて噴霧口から垂直方向に離れれば、一様に粒子径は増加した。

空気圧 0.05MPa で、流量を 100mL/min (図 3 (a))

図 2 装置概要図

から 200mL/min (図3 (b)) に変化させると、全体で粒子径が数 μm 程度減少した。流量を 100mL/min (図3 (a)) から 300mL/min (図3 (c)) に変化させても、全体で数 μm しか減少しなかった。

流量 100mL/min (図3 (a)) の場合、計測開始点から垂直方向に 200mm 離れた地点では粒子径は計測開始点よりも 11.8 μm (5.4%) 増加した。同様に流量が 200mL/min (図3 (b)), 300mL/min (図3 (c)) の場合も粒子径が約 7.7%増加した。

空気圧 0.10MPa の粒子径は、垂直方向で粒子径を計測した場合、100mL/min (図3 (d)) では粒子径は計測開始点より 22.6 μm (10.5%) 増加した。同様に、

200mL/min (図3 (e)), 300mL/min (図3 (f)) の場合は、粒子径がそれぞれ 9.5%, 10.2%増加し、計測開始点から垂直方向に離れるほど粒子径が増加した。

同計測地点において空気圧 0.05MPa と比較すると、計測開始地点から垂直に離れるほど空気圧 0.10MPa の水滴粒子のほうが、粒子径が大きくなる傾向が見られた。よって、スクラバの下流では大きな粒子が、上流では小さな粒子が捕集できる可能性がある。

以上より、空気圧 0.10MPa は、垂直方向の粒子径に幅が生まれ、水平方向は粒子径の減少は見られず安定な粒子径が実現できた。したがって、空気圧 0.10MPa で今後の実験を行うこととした。

(a) 拡散状態図 (100mL/min, 0.05MPa, -0kV)

(d) 拡散状態図 (100mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(b) 拡散状態図 (200mL/min, 0.05MPa, -0kV)

(e) 拡散状態図 (200mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(c) 拡散状態図 (300mL/min, 0.05MPa, -0kV)

(f) 拡散状態図 (300mL/min, 0.10MPa, -0kV)

図3 粒子径分布

4.2 噴霧水滴流量変化による粒子速度の変化

図4に流量変化による粒子速度の変化を示す。流量100mL/min (図4 (a)) は、計測開始点における粒子速度は42.7m/sであった。噴霧口直下の最下点では粒子速度は14.5m/sであり、計測開始点に比べ速度は66.1%減少した。流量200mL/min (図4 (b))、300mL/min (図4 (c)) の場合は、60%、57.4%速度の減少が見られ、計測開始点から垂直方向に離れるほど粒子速度は減少する傾向が見られた。この傾向は、静電水スプレより噴霧された水滴粒子に落下速度の二乗に比例した空気抵抗が作用し、重力よりも空気抵抗が大きく作用し、垂直方向で速度が減少したと考える。

(a) 拡散状態図 (100mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(b) 拡散状態図 (200mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(c) 拡散状態図 (300mL/min, 0.10MPa, -0kV)

図4 流量変化による粒子速度との関係

4.3 噴霧水滴流量変化による粒子数の変化

図5に流量変化による粒子数の変化を示す。流量100mL/min (図5 (a)) は、噴霧口直下で約400個—550個の粒子が計測され、水平方向に距離が離れるほど粒子数が多くなった。反対に、流量200mL/min (図5 (b))、300mL/min (図5 (c)) は、噴霧口直下で約730個—570個及び930個—600個となった。

流量100mL/min (図5 (a)) は、噴霧口直下において、流量が少ないため十分に霧状にならず、粒子が細かくなりながら水平方向に噴霧したと考える。反対に、流量200mL/min (図5 (b))、300mL/min (図5 (c)) は、噴霧口直下で十分に霧状になり、噴霧口直下の個

(a) 拡散状態図 (100mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(b) 拡散状態図 (200mL/min, 0.10MPa, -0kV)

(c) 拡散状態図 (300mL/min, 0.10MPa, -0kV)

図5 流量変化による粒子数との関係

数が多く、噴霧中に他の水滴粒子と衝突回数が多くなり、水平方向の粒子数が減少したと考える。

4.4 スクラバによる NOx の捕集

噴霧水滴流量と噴霧水滴の印加電圧による排出ガス中の NOx の濃度を図 6 に示す。空気圧 0.10MPa の下、電圧 0kV において流量を変化させた場合、排出ガス中の NOx は 168ppm から最大で 152ppm へと減少し、NOx は 9.5%低減され、噴霧水滴粒子と NOx の衝突により低減できたと考える。

NOx の一つである NO₂ は水溶性であるため、NO₂ の水滴への溶解が NOx 削減の要因になったと考える。流量を増加させると、単位空間あたりの粒子数が増加し NOx 及び水滴粒子の衝突頻度が高まり、流量の増加とともに NOx の捕集量も増加したと考える。

－10kV 及び－20kV の電圧を印加した場合は、145ppm, 144ppm となった。同流量における印加電圧の差による捕集率の変化は約 5%となり、低減量は捕集前の 13.6%及び 14.3%となった。

水滴側には霧化用空気が存在し、電界によってオゾンが発生すると考える。式 (8) に示すように、オゾンは、NO と反応し、NO₂ へと化学変化する。先に述べたように、NO₂ は水滴へ溶解するため、印加電圧が増加するほど効率が上昇したと考える。

4.5 スクラバによる PM の捕集

静電水スプレにより空気圧 0.10MPa における流量 100, 200, 300mL/min での噴霧水滴に電圧を印加した時の PM 捕集効率を図 7, PM 重量濃度を図 8 に示す。電圧を印加しない状況が 0kV である。

0kV の PM 捕集効率はそれぞれ 37.1%, 40.9%, 36.5%となり流量 200mL/min において最も捕集効率が大きくなった。－20kV の PM 捕集効率は 38.9%, 32.1%, 36.5%となった。－10kV の PM 捕集効率は、38.7%, 42.1%, 39.6%となった。PM 重量濃度では、未処理の排ガスの PM 重量濃度は 63.6mg/m³ であったが、各流量で、PM 粒子重量濃度は約 40mg/m³ に低減できた。

電圧の変化に着目して PM 捕集効率を見ると、噴霧水滴への帯電作用が影響していないことがわかる。これは、水滴粒子へ帯電が行われても、PM へは帯電されず、静電引力が作用していない。噴霧水滴粒子と PM の衝突のみで捕集できたと考える。

図 6 排出ガス中の NOx 濃度

図 7 スクラバによる PM 捕集効率

図 8 スクラバによる PM 重量濃度

図 9 PM 充電器による PM 捕集効率

4.6 PM 電荷付加によるスクラバ実験

空気圧 0.10MPa, 流量 200mL/min において、PM 充電器と静電水スプレと併用した時の PM 捕集効率を図 9 に示す。また、表 2 に示すように、PM 充電器の設定電圧は－5, －6.5, －7kV の 3 パターンとした。

PM のみに帯電させると、－6.5kV で PM 捕集効率が約 65%になった。PM に－5kV の電圧を与え、静電水スプレの印加電圧を 0, －10, －20kV とすると、PM

捕集効率は 36.1%, 39.3%, 42.6%で, -6.5kV 及び -7kV の電圧を与えた場合, PM は約 100% 捕集できた。

最も捕集効率が大きいのは, 水滴粒子と PM に電荷を与えた場合であった。スクラバ単体の PM の捕集や水滴粒子および PM の一方に帯電を行って PM を捕集させるよりも, 水滴粒子と PM との帯電による静電引力が PM の捕集に最も作用したと考える。

PM 充電器の印加電圧に関して, 電圧の増加とともに PM 捕集効率が増加している。しかし, PM 印加電圧が -6.5kV より -7kV の方が PM 捕集効率は小さくなった。PM 充電器において, 電圧を印加しすぎると, コロナ放電から火花放電に移行したため, 帯電量が減少したことが原因と考える。

今後の展望は, スクラバ廃水処理する必要がある, 廃水処理を含め, 船舶への搭載を目指したい。

5. 結 論

本研究では, 以下の結論を得た。

- (1) 静電水スクラバのみに負極に帯電させても, PM の捕集効率約 40% となり, 変化が少なかった。

- (2) PM 充電器のみで PM に帯電を行った場合では -6.5kV で PM 捕集効率が約 65% になった。

- (3) 静電水スプレと PM 充電器を用いて水滴粒子と PM を同時に帯電させた場合が最も捕集効率が大きく, ほぼすべての PM を捕集できた。

- (4) NO_x , PM の同時捕集は可能であり, NO_x 削減率は約 14% となった。

参 考 文 献

- 1) 武田進; 気体放電の基礎, 東京電機大学出版会, 55-88, 1990.
- 2) 金田輝夫; 気体エレクトロニクス, コロナ社, 123-132, 147-162, 2003.
- 3) W. Balachandran; Efficiency of smoke removal by charged water droplets, Journal of ELECTROSTATICS, 2003.
- 4) Tran Hong Ha; 静電噴霧式スクラバを使用したディーゼル微粒子 (DPM) の低減について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 119-125, 2009.
- 5) Tran Hong Ha; 静電水スクラバによるディーゼル微粒子の捕集の予測, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 126-133, 2009.
- 6) 高橋雄造; 静電気が分かる本, 工業調査会, 30-37, 94-101, 2007.

NO_x and PM Emission Reduction Using an Electrostatic Water Scrubber and PM Charger; With Findings on the Variation of Trapping Efficiency of PM Depending on the Behavior of Scrubber Water

Atsuyoshi TAKAYAMA*, Tomohisa KAGEYAMA*, Hitotsugu FUJITA*, Wataru HARANO*

* Kobe University

ABSTRACT

In recent years exhaust emissions regulations are gradually becoming stricter, and a reduction of exhaust gas density is a pressing need, thus highlighting the need for research in emissions reduction. This study develops an electrostatic water atomization scrubber that combines dryness electrostatic dust collection with the merit of the scrubber to remove NO_x and PM in exhaust gas. It is a mechanism using electrification, where a charged drop of water collects PM in opposite polarity using Coulomb attraction. NO_x is dissolved into the solvent, and a mist spray is used for atomization. With air pressure of 0.10MPa, the particle diameter in the horizontal direction was steady, and the influence by flowing quantity was almost zero. If the particle diameter in the vertical direction becomes far from the atomization entrance, the particle diameter has grown. We can collect PM of distinct diameters by increasing the particle diameters. A flow quantity of 200mL/min was the maximum PM collection rate with only the water scrubber of static electricity. It was possible to decrease NO_x about 14% and PM about 100% while using this combination with the PM charger.

Keyword : Static Electricity Scrubber, Electric Glow, NO_x , PM, Behavior of Atomization Water